

PERANCANGAN DAN ANALISIS SISTEM OTOMASI PADA PROSES PRODUKSI BIOETANOL MENGGUNAKAN JALA PETRI SINYAL TERINTERPRETASI (JPST)

Endra Joelianto⁽¹⁾ dan Alex Dananjaya⁽²⁾

^{(1),(2)} Kelompok Keahlian Instrumentasi dan Kontrol
Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
Email: ejoel@tf.itb.ac.id

DESIGN AND ANALYSIS OTOMATION ON BIOETHANOL PRODUCTION PROCESS USING SIGNAL INTERPRETATION PETRI NETWORK (SIPN)

Abstract: Signal Interpreted Petri Net (SIPN) is one of the formal methods to design and to analyze behavior of automation systems. Using SIPN, it can be shown the relationship between developed algorithms and sequential processes. SIPN diagram can then be implemented in general controller hardware such as Programmable Logic Controller (PLC). In this paper, an algorithm for bio-ethanol process production automation system is developed by using SIPN method. The developed algorithm is then analyzed using invariant method. It is found that the resulted automation algorithm achieves high transparency metrics and has no conflicts.

Keywords: Petri Net, Signal Interpreted Petri Net, Bio-ethanol, Intelligent automation

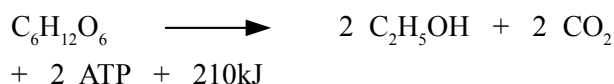
Semakin langkanya minyak bumi yang berasal dari fosil menyebabkan harga minyak meningkat terus, karena cadangan yang tersedia semakin menipis. Oleh karena itu, bioetanol yang dulunya dimanfaatkan untuk produksi kosmetik dan perawatan tubuh, industri deterjen, dan pembersih barang rumah tangga, industri obat luar, dan obat-obatan, sekarang mulai dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif. Campuran bahan bakar fosil dengan bioetanol (Gasohol) terbukti dapat menghemat

pemakaian Bahan Bakar Minyak (BBM) dan telah diterapkan di berbagai negara di dunia. Pemerintah Republik Indonesia telah mengizinkan untuk penggunaan Gasohol dengan campuran 10% bioetanol.

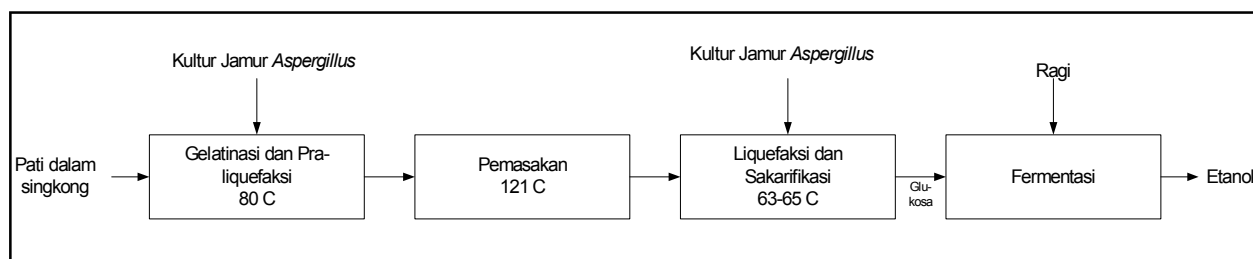
Produksi bioetanol melalui beberapa tahapan, setiap tahapan proses memerlukan pengontrolan agar didapatkan perolehan produk bioetanol yang memenuhi kualitas dan kuantitas yang diharapkan. Proses enzimatik pati menjadi alkohol berbahan baku singkong dengan melalui proses pemasakan secara

umum diperlihatkan dalam Gambar 1. Agar proses pembuatan bioetanol secara keseluruhan dapat dilaksanakan secara optimal, maka keluaran dari setiap tahapan proses harus berjalan dengan baik, hal ini dapat dicapai bila beberapa parameter dapat dikontrol besarnya atau nilainya. Oleh karena itu, proses produksi bioetanol perlu dilengkapi dengan sistem instrumentasi, kontrol dan mekanisme pengotomasi proses untuk mengontrol variabel-variabel proses dan menjalankan sekuen proses pada setiap tahap pembuatan, agar dapat dihasilkan produk bioetanol yang optimal.

eksotermal, maka harus diusahakan agar reaksi dapat berlangsung secara isothermal. Selain etanol, karbondioksida, dan energi, reaksi fermentasi juga menghasilkan produk samping berupa 2 ATP sebagai sumber energi untuk metabolisme sel. Sehingga, reaksi fermentasi (secara sederhana) bisa dituliskan sebagai berikut (Shuler and Kargi, 1992):



Dalam proses fermentasi anaerob, etanol yang dihasilkan dalam proses fermentasi dapat dimanfaatkan dalam proses pembuatan bir dan *wine*.



Gambar 1 Diagram Proses Produksi Bioetanol dari Singkong

Berdasarkan kondisi lingkungannya, proses fermentasi oleh mikroba *Saccharomyces cerevisiae* bisa digolongkan menjadi 2 jenis, yaitu fermentasi aerob dan fermentasi anaerob. Pada proses fermentasi aerob, produk yang dihasilkan adalah asam laktat ($\text{CH}_3\text{-CH(OH)-COOH}$); sedangkan pada proses fermentasi anaerob akan dihasilkan etanol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$) (Curran, 1989). Secara sederhana, reaksi yang terjadi pada proses fermentasi anaerob secara stoikiometri dapat ditulis sebagai berikut:



Reaksi di atas termasuk reaksi eksotermal, di mana dihasilkan kalor reaksi sebesar 210kJ/mol glukosa. Oleh karena reaksi fermentasi adalah reaksi

Pada proses fermentasi etanol, berdasarkan kadar alkohol yang dihasilkan, *Saccharomyces cerevisiae* dapat digolongkan menjadi *lager yeast* (produknya memiliki kadar alkohol sampai dengan 5%-volume) dan *ale yeast* (produknya memiliki kadar alkohol lebih dari 5%-V).

Jika dilihat dari morfologi sel, *lager yeast* memiliki bentuk oval. *Lager yeast* merupakan *bottom fermenters*, karena selama proses fermentasi berlangsung sel *yeast* akan turun dan mengendap di tangki fermentasi. Jika produk diambil (dari atas), maka *yeast* akan tertinggal di dasar tangki. Sedangkan, *ale yeast* bentuknya bulat dan merupakan *top fermenters*, karena selama proses fermentasi berlangsung sel *yeast* perlahan akan naik ke

bagian atas (permukaan) (Pederson, 1978). Sehingga, pada saat proses fermentasi selesai, produk dapat diambil dari bawah. Baik *ale yeast* maupun *lager yeast*, pada saat fermentasi berlangsung sel *yeast* akan berkumpul di suatu tempat, sehingga biomassa menjadi tidak terdistribusi homogen. Oleh karena itu, perlu suatu sistem pengadukan yang baik agar biomassa dapat terdistribusi merata, sehingga proses fermentasi dapat berlangsung dengan baik.

Saat proses fermentasi berlangsung, *yeast* menghasilkan banyak gas CO₂. Hal inilah yang menjadi alasan mengapa *Saccharomyces cerevisiae* juga digunakan sebagai pengembang roti. Menjelang proses fermentasi, sel akan bertumbuh cepat sekali. Pada saat fermentasi berlangsung, *yeast* sangat rentan terhadap kontaminasi mikroba lain, terutama bakteri dari udara dan protozoa dari air baku. Adanya kontaminasi bakteri dan protozoa ini harus dihindari, karena bakteri berkembangbiak lebih cepat daripada *yeast* dan bakteri dapat memproduksi suatu senyawa yang dapat meracuni sel *yeast* atau menghambat enzim yang berperan dalam proses fermentasi (misal: bakteri *Escherichia coli*). Sedangkan protozoa, terutama dari *class Rhizopoda* karena ukurannya yang lebih besar dapat “memakan” sel *yeast* (Sheehan, 1995).

Standar perbandingan (yang dianjurkan) antara populasi bakteri banding *yeast* adalah maksimal 2 bakteri per 1000 *yeast*. Sedangkan, protozoa tidak boleh ada. Untuk mengurangi efek kontaminasi bakteri dapat dilakukan dengan penambahan asam. Penambahan asam sampai batas pH tertentu dapat menekan laju pertumbuhan bakteri, bahkan bisa membunuh bakteri (khususnya bakteri yang tidak

tahan asam, seperti *Escherichia coli*) karena dapat mengacaukan metabolisme sel bakteri tanpa mempengaruhi metabolisme sel *yeast*. Adanya kontaminasi mikroba lain dapat dilihat dengan mengambil sampel cairan lalu diamati dengan mikroskop (Sheehan, 1995).

Pada saat proses fermentasi berlangsung, pH akan menjadi sedikit turun (menjadi lebih asam). Hal ini dapat terjadi karena adanya penyederhanaan protein menjadi asam amino dan dihasilkannya asam laktat (dalam jumlah sedikit) (Curran, 1989). Selain penurunan pH, selama proses fermentasi suhu sistem juga dapat mengalami kenaikan jika tidak ada pengontrolan temperatur. Sehingga, dalam proses fermentasi, masalah utama yang dihadapi adalah kontaminasi mikroba lain, pengadukan, dan pengontrolan temperatur. Pada fermentasi dengan *lager yeast*, proses fermentasi idealnya dilangsungkan pada suhu sekitar 10 – 15 °C (50 – 60 °F) selama 8 hari. Sedangkan, fermentasi dengan *ale yeast* idealnya dilangsungkan pada suhu sekitar 15 – 21 °C (60 – 70 °F) selama 7 hari (Pederson, 1978).

Bioproses adalah cabang ilmu dari biokimia yang mempelajari bagaimana melakukan perencanaan, pengembangan, dan analisis proses yang berhubungan dengan biokatalis (Shuler and Kargi, 1992). Industri bioproses seringkali (bahkan hampir selalu) melibatkan makhluk hidup uniseluler (bersel tunggal) yang disebut “mikroba”. Selanjutnya, mikroba ini akan menghasilkan suatu enzim. Enzim inilah yang akan mengkatalis suatu reaksi, sehingga enzim dapat juga disebut sebagai “biokatalis” (Pederson, 1978). Perkembangan ilmu bioproses didukung pula oleh ilmu kinetika, yang ruang lingkupnya mempelajari mekanisme suatu reaksi dan menyatakannya ke

dalam suatu persamaan matematis. Bioproses banyak diterapkan dalam proses industri karena memiliki cara praktis untuk mendapat produk yang diinginkan.

Sistem otomasi memegang peranan penting dalam suatu proses di industri termasuk bioproses, dengan sistem otomasi yang baik, maka suatu proses produksi di industri dapat dijalankan menjadi lebih ekonomis. Perancangan sistem otomasi yang akan berjalan dengan baik memerlukan suatu metode yang dapat menyatakan suatu jaminan bagaimana sistem otomasi yang dirancang akan mengatur proses yang dikontrol berjalan seperti yang diinginkan. Metode coba-coba berdasarkan suatu logika yang terlatih mempunyai kekurangan untuk dapat memperlihatkan ukuran kinerja keberhasilan sistem otomasi yang dihasilkan. Sehingga, diperlukan metode formal yang mampu memberikan hasil analisis yang dapat dilacak kembali hasilnya dan dapat dipertanggungjawabkan.

Salah satu metode formal yang banyak digunakan untuk merancang dan menganalisis sistem otomasi adalah JPST atau *SIPN* (Frey and Schettler, 1998; Frey, 2000a; 2000b). JPST merupakan pengembangan lanjut dari Jala Petri (JP) (*Petri Net (PN)*) biasa. JP biasa diperkenalkan pertama kali oleh C.A. Petri dalam disertasi doktornya pada akhir tahun 1960-an. Berdasarkan JP biasa ini, dikembangkan berbagai JP khusus yang digunakan dalam kasus-kasus tertentu. Salah satunya adalah JPST, yaitu JP yang bisa menggambarkan hubungan antara algoritma yang disusun dengan lingkungannya. Hubungan antara algoritma dengan lingkungannya digambarkan melalui sinyal masukan dan sinyal keluaran. Aplikasi JPST untuk merancang berbagai sistem otomasi,

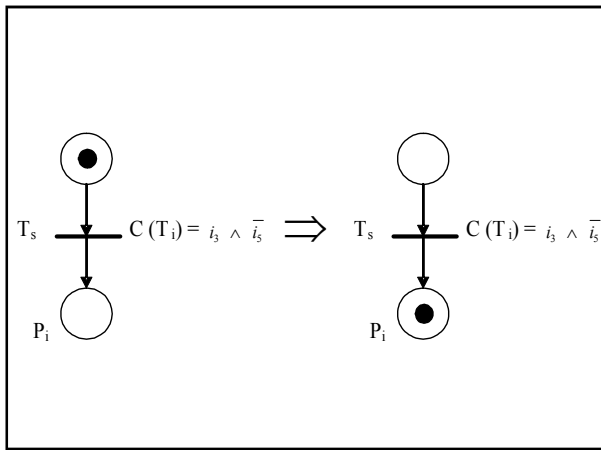
sebagai contoh *boiler*, sistem pompa dan sistem turbin angin dan PV surya, dapat dilihat pada (Joelianto dan Loeis, 2006; Joelianto, dkk., 2006; Mostavan, dkk., 2006). Keperluan penerapan sistem otomasi yang baik dan terstruktur secara khusus pada proses curah telah juga dibahas pada rekomendasi oleh masyarakat *Instrumentation, System and Automation (ISA)* yang dikenal dengan standard S88 (Parshall dan Lamb, 2001).

Dalam makalah ini, JPST akan digunakan untuk merancang sistem otomasi pada proses pembuatan bioetanol. Bioetanol merupakan salah satu sumber energi alternatif yang memiliki potensi yang sangat menjanjikan. Oleh karena itu, diperkirakan kebutuhan masyarakat terhadap bioetanol akan meningkat dari waktu ke waktu. Supaya produksi bioetanol bisa memenuhi kebutuhan tersebut, perlu adanya suatu proses pembuatan bioetanol yang ekonomis dan menghasilkan kualitas produk yang tinggi. Salah satu cara adalah dengan menerapkan sistem otomasi yang berkinerja baik. Sistem otomasi yang dibangun akan dirancang menggunakan JPST, kemudian diterapkan ke dalam bahasa pemrograman *PLC* dalam bentuk diagram tangga. Analisis digunakan untuk melihat kinerja algoritma yang telah dibangun dengan menggunakan metode analisis invarian (Wang, 1998) dan grafik ketercapaian (Frey, 2000a).

JPST

JPST memberikan penjabaran yang lebih luas dari JP. Pada JPST, JP dimungkinkan untuk menerima aliran informasi dari luar dan memberikan informasi ke luar sistem. Syarat kondisi terpicunya suatu transisi selain kondisi pengisian token

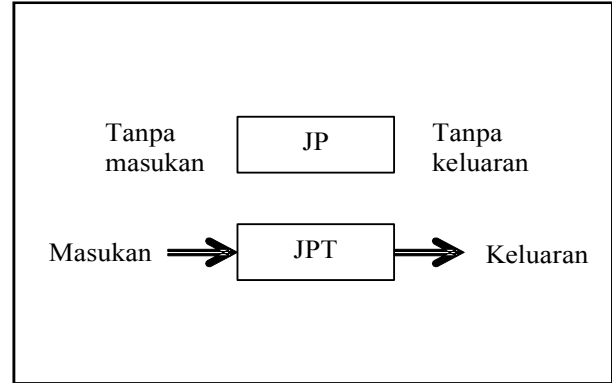
pada tempat (*place*) yang dihubungkan dengan busur ke transisi tersebut adalah aktifnya masukan (*input*) tertentu yang akan memulai pemicuan suatu transisi. Masukan atau kombinasi masukan yang menjadi syarat awal pemicuan suatu transisi tertentu disebut sebagai kondisi C (*condition*), di mana $C(T_i) \otimes T_i$. Contoh pada Gambar 2 memperlihatkan terpicunya suatu transisi apabila syarat masukan (*input*) pada kondisinya $C(T_i)$ telah terpenuhi.



Gambar 2 Syarat Kondisi pada Transisi pada JPST

T_i akan terpicu bila T_i dimungkinkan untuk terpicu (*enable*) dan kondisi $C(T_i)$ terpenuhi (hasil operasi persamaan *boolean* dalam kondisi bernilai 1. Adapun masukan (*input*) untuk sistem akan bernilai biner (1 atau 0). Selain masukan, dalam IPN juga dimungkinkan adanya keluaran (*output*) $A(O)$, A merupakan singkatan dari aksi (*action*). Aksi dalam Jala Petri Terinterpretasi (JPT) akan dimiliki oleh tempat, sehingga himpunan keluaran pada suatu kondisi pengisian token pada tempat pada suatu saat, merupakan kombinasi dari semua aksi pada semua tempat (*place*) yang aktif pada saat tersebut.

Sedangkan, perbedaan antara JP dan JPT dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Bagan JP dan JPT

Secara formal, JPST didefinisikan sebagai himpunan dengan 9 anggota tupel sebagai berikut (Frey and Schettler, 1998):

$$JPST = (P, T, F, I, O, M_0, \varphi, \omega, \Omega)$$

dengan

- P : sejumlah tempat
- T : sejumlah transisi
- F : busur
- M_0 : penanda awal
- I : sejumlah sinyal masukan
- O : sejumlah sinyal keluaran
- φ : pemetaan yang menghubungkan setiap transisi $t_i \in T$ dengan kondisi penembakan, $\varphi(t_i) = \text{fungsi Boolean dalam } I$
- ω : pemetaan yang menghubungkan setiap tempat $p_i \in P$ dengan keluaran $\omega(p_i) \in (0, 1, -)^{|O|}$, $(-)$ berarti sinyal tidak dipedulikan.
- Ω : fungsi keluaran yang menggabungkan semua keluaran dari semua tempat bertanda $\Omega \rightarrow M_0 (-, 0, 1, c, r_0, r_1, c_0, c_1, c_{01})^{|O|}$, c be-

rarti kontradiksi, r_0 berarti sinyal berlebih 0, r_1 berarti sinyal berlebih 1, c_0 berarti bertentangan dan sinyal berlebih 0, c_1 berarti bertentangan dan sinyal berlebih 1, c_{01} bertentangan dan berlebih 0 dan 1.

Tempat dalam JPST bisa disamakan dengan suatu kondisi, sedangkan transisi bisa disamakan dengan kejadian yang mengakibatkan perubahan kondisi. Penanda berfungsi untuk menandai kondisi yang sedang berlangsung. Busur menunjukkan arah perpindahan penanda jika terjadi suatu pemicuan transisi. Pemicuan transisi yang mengakibatkan perpindahan penanda dikenal dengan istilah penembakan. Dalam JPST, proses penembakan mengikuti aturan sebagai berikut (Frey and Schettler, 1998): (1) transisi terpicu seketika jika dan hanya jika transisi tersebut siap dan kondisi penembakannya terpenuhi, pemicuan ini akan memindahkan semua penanda dari tempat asal dan akan menandai semua tempat tujuan, (2) semua transisi yang bisa terpicu dan tidak dalam memiliki konflik dengan transisi lain akan terpicu secara bersamaan, dua transisi berada dalam konflik jika pemicuan suatu transisi menyebabkan transisi yang lain tidak bisa terpicu, (3) proses penembakan terus berlangsung sampai diperoleh penandaan stabil (tidak ada lagi transisi yang bisa terpicu), (4) setelah penandaan stabil tercapai, sinyal keluaran dihitung ulang dengan menerapkan fungsi Ω pada penandaan.

Analisis JPST

Analisis *Invariant*

Dinamika penanda bisa dinyatakan dengan matriks kejadian $A_{ij} = [a_{ij}]$ persamaan matematis sebagai berikut (Wang, 1998):

$$a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^- \quad (1)$$

dengan:

$a_{ij}^+ = O(T_i, P_j)$ adalah bobot busur yang mengarah dari transisi i ke tempat tujuan j , dan $a_{ij}^- = I(T_i, P_j)$ adalah bobot busur yang mengarah ke transisi i dari tempat asal j .

Secara matematis, proses penembakan ditulis sebagai:

$$M_k = M_{k-1} + A^T u_k \quad (2)$$

M_k : vektor penandaan yang bisa dicapai setelah terjadi pemicuan suatu transisi

M_{k-1} : vektor penandaan sebelum pemicuan suatu transisi

A : matriks kejadian

U_k : vektor transisi

Suatu penyelesaian bilangan bulat yang memenuhi:

$$A^T x = 0 \quad (3)$$

Disebut dengan T-invariant. Vektor kolom x menyatakan pemicuan transisi-transisi yang berasal dan menuju penandaan yang sama.

Suatu penyelesaian bilangan bulat yang memenuhi:

$$Ay = 0 \quad (4)$$

Disebut dengan P-invariant. Vektor kolom y menyatakan kemungkinan tempat-tempat yang dilalui penanda dalam suatu pemicuan.

Grafik Ketercapaian

Grafik ketercapaian merupakan grafik yang menampilkan alur kondisi-kondisi penandaan yang bisa diperoleh jika terjadi proses penembakan.

Kriteria JPST

Diagram JPST yang disusun harus memenuhi kriteria sebagai berikut (Frey and Schettler, 1998):

Kriteria wajib:

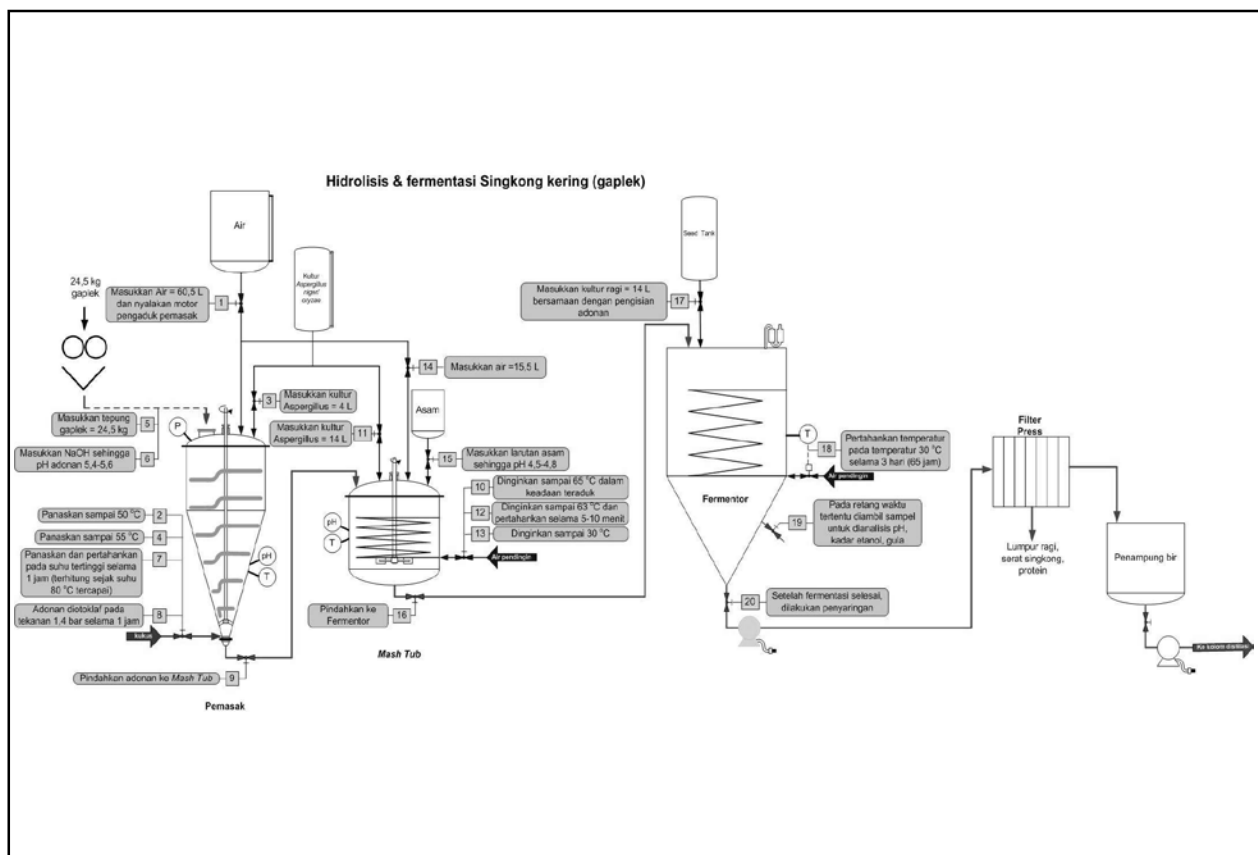
- Bebas konflik: kondisi pemicuan di setiap percabangan dalam grafik ketercapaian tidak ada yang berpotongan.
- Terminasi: tidak ada busur yang mengarah ke kondisi asalnya.
- Sinyal keluaran benar secara formal, yaitu jika kedua kriteria ini terpenuhi:
 - Sinyal keluaran ditentukan: sinyal keluaran memiliki nilai tertentu.
 - Sinyal keluaran tidak kontradiksi: sinyal keluaran tidak ada yang bernilai 0 dan 1 pada waktu yang sama.

Kriteria pilihan:

- Daya hidup: setiap keadaan dalam grafik ketercapaian memiliki lintasan yang melalui semua transisi yang ada.
- Bebas kebuntuan: semua keadaan dalam grafik ketercapaian memiliki busur yang mengarah ke luar.
- Keterbaruan: ada busur yang mengarah ke penandaan awal M0.

Perancangan Otomasi Proses Produksi Bioetanol

Proses pembuatan bioetanol secara ringkas yang akan dirancang sistem otomasinya diperlihatkan oleh Gambar 4.

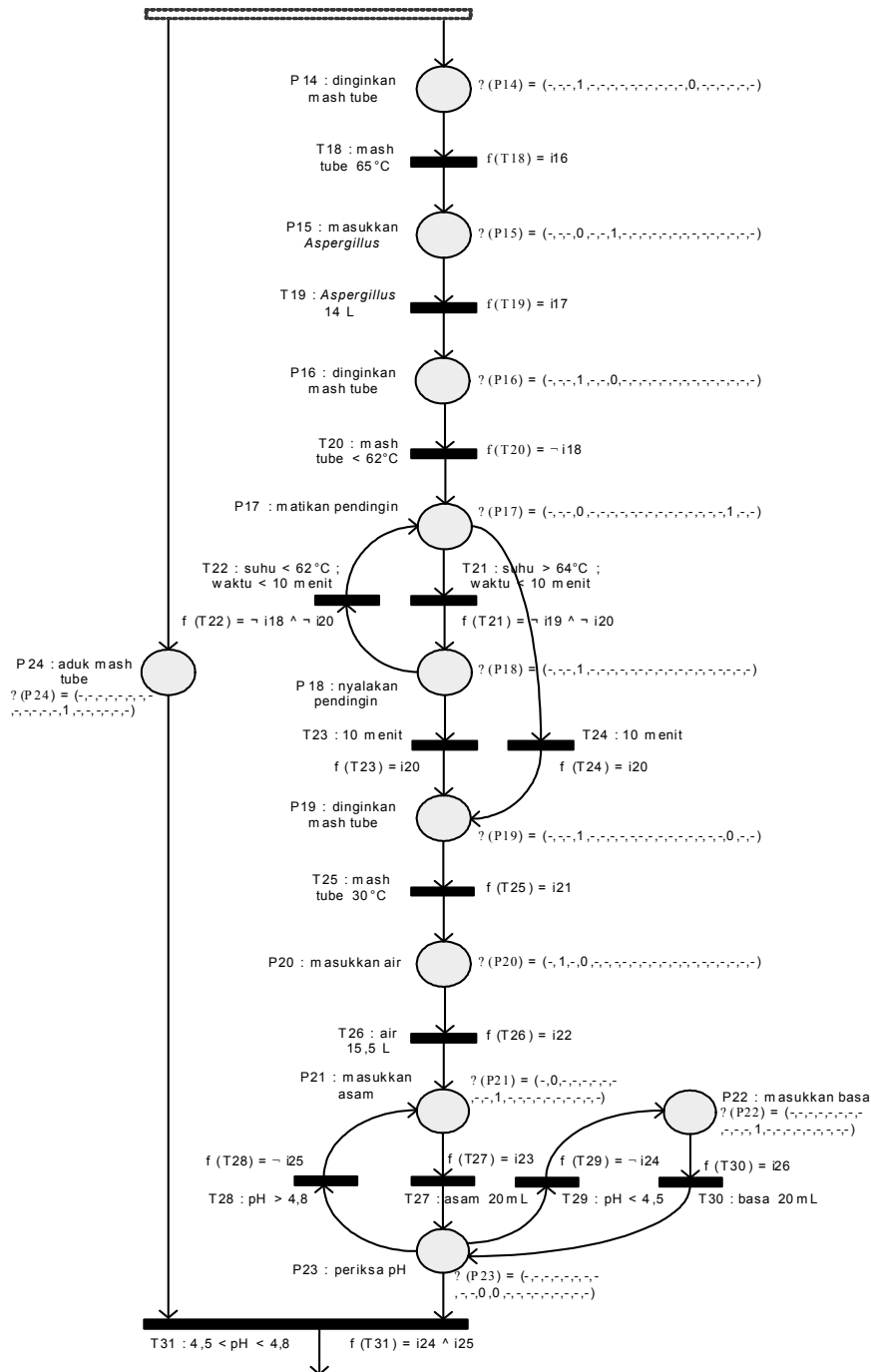


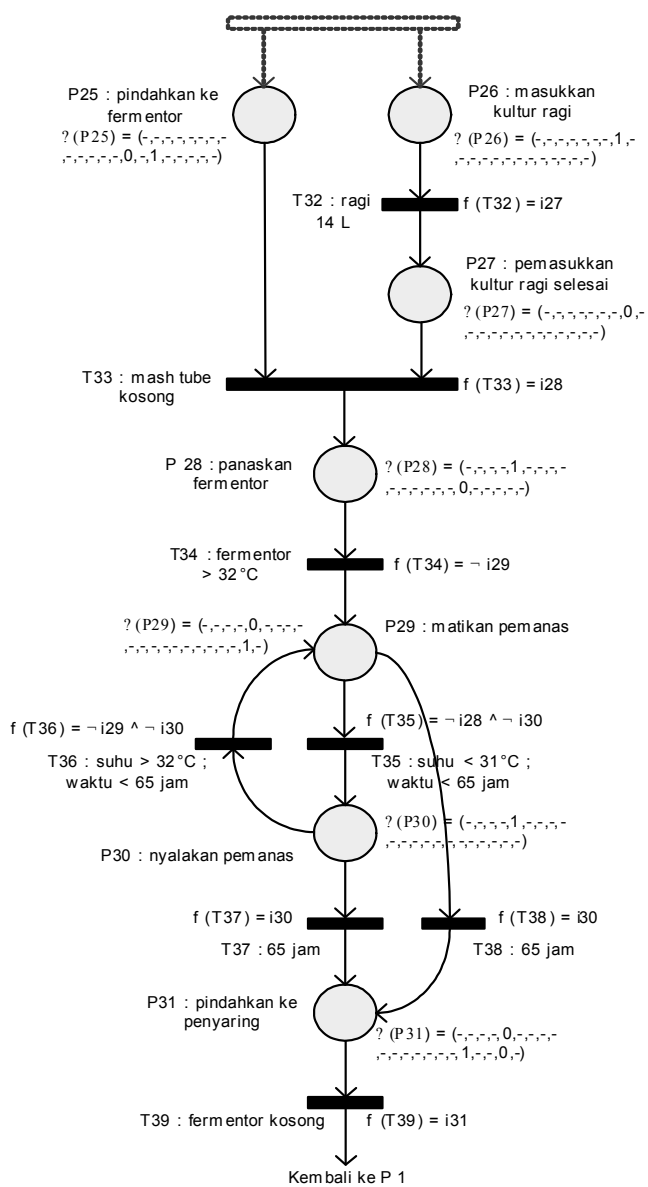
Gambar 4 Diagram Blok Proses Pembuatan Bioetanol di Teknik Kimia - ITB

Dari proses produksi bioetanol yang telah masukan dan keluaran seperti diperlihatkan pada ditunjukkan pada Gambar 4, disusun daftar sinyal Tabel 1.

Tabel 1 Sinyal Masukan dan Sinyal Keluaran

MASUKAN (kondisi aktif)	KELUARAN (kondisi aktif)
i1: tombol "mulai" ditekan	o1: katup air ke tangki pemasak membuka
i2: air sudah 60,5 L	o2: katup air ke mash tube membuka
i3: tangki pemasak sudah 50°C	o3: katup uap pemanas ke tangki pemasak membuka
i4: kultur <i>Aspergillus</i> sudah 4L	o4: katup air pendingin ke mash tube membuka
i5: tangki pemasak sudah 55°C	o5: katup air pemanas ke fermentor membuka
i6: tepung gaplek sudah 24,5 kg	o6: katup kultur <i>Aspergillus</i> ke tangki pemasak membuka
i7: asam tangki pemasak sudah 20 mL	o7: katup kultur <i>Aspergillus</i> ke mash tube membuka
i8: pH > 5,4	o8: katup kultur ragi ke fermentor membuka
i9: pH < 5,6	o9: katup asam ke tangki pemasak membuka
i10: basa tangki pemasak sudah 20 mL	o10: katup basa ke tangki pemasak membuka
i11: tangki pemasak 80°C	o11: katup asam ke mash tube membuka
i12: tekanan > 1,39 bar	o12: katup basa ke mash tube membuka
i13: tekanan < 1,41 bar	o13: pengaduk tangki pemasak aktif
i14: otoklaf sudah 1 jam	o14: pengaduk mash tube aktif
i15: tangki pemasak kosong	o15: katup tangki pemasak ke mash tube membuka
i16: suhu mash tube 65°C	o16: katup mash tube ke fermentor membuka
i17: kultur <i>Aspergillus</i> 14 L	o17: katup fermentor ke panyaring membuka
i18: suhu > 62°C	o18: <i>timer</i> tangki pemasak aktif
i19: suhu < 64°C	o19: <i>timer</i> mash tube aktif
i20: sudah 10 menit	o20: <i>timer</i> fermentor aktif
i21: suhu 30°C	o21: lampu pertanda bahwa pemasukan tepung gaplek sudah bisa dilakukan menyala
i22: air 15,5 L	
i23: asam mash tube sudah 20 mL	
i24: pH > 4,5	
i25: pH < 4,8	
i26: basa mash tube sudah 20 mL	
i27: ragi 14L	
i28: suhu > 31°C	
i29: suhu < 32°C	
i30: sudah 65 jam	





Lanjutan Gambar 5 Diagram JPST

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan diagram JPST pada Gambar 5, selanjutnya dapat diperoleh matriks T-invariant dan P-invariant dari proses otomasi fermentasi

bioetanol. Matriks P-invariant dapat dilihat pada Tabel 2.

Sedangkan, untuk matriks T-invariant dapat dilihat pada Tabel 3.

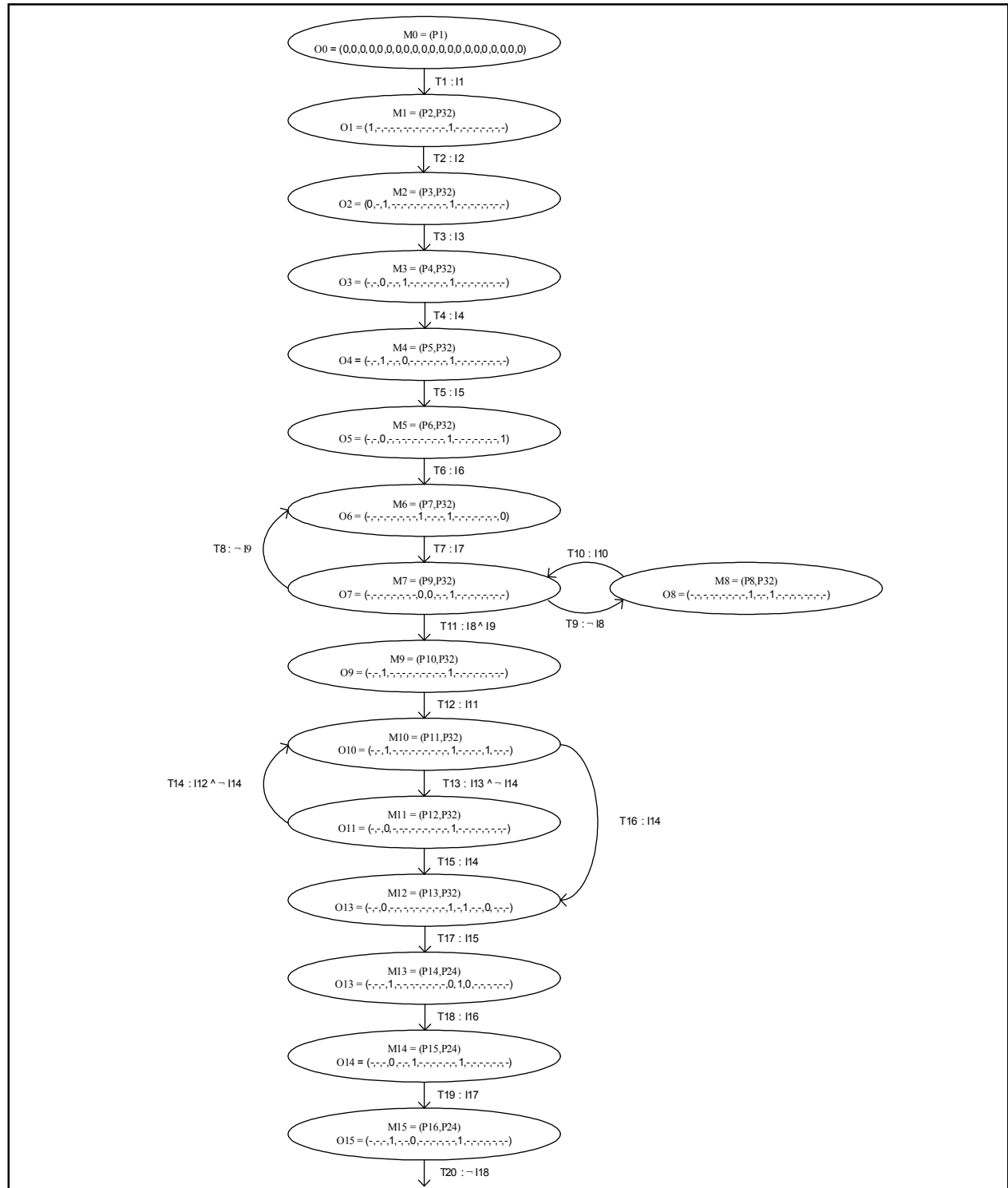
Tabel 2 P-invariant

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8
P1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	0	1	0	1	0	1	0	1
P3	0	1	0	1	0	1	0	1
P4	0	1	0	1	0	1	0	1
P5	0	1	0	1	0	1	0	1
P6	0	1	0	1	0	1	0	1
P7	0	1	0	1	0	1	0	1
P8	0	1	0	1	0	1	0	1
P9	0	1	0	1	0	1	0	1
P10	0	1	0	1	0	1	0	1
P11	0	1	0	1	0	1	0	1
P12	0	1	0	1	0	1	0	1
P13	0	1	0	1	0	1	0	1
P14	0	0	1	1	0	0	1	1
P15	0	0	1	1	0	0	1	1
P16	0	0	1	1	0	0	1	1
P17	0	0	1	1	0	0	1	1
P18	0	0	1	1	0	0	1	1
P19	0	0	1	1	0	0	1	1
P20	0	0	1	1	0	0	1	1
P21	0	0	1	1	0	0	1	1
P22	0	0	1	1	0	0	1	1
P23	0	0	1	1	0	0	1	1
P24	1	1	0	0	1	1	0	0
P25	1	1	1	1	0	0	0	0
P26	0	0	0	0	1	1	1	1
P27	0	0	0	0	1	1	1	1
P28	1	1	1	1	1	1	1	1
P29	1	1	1	1	1	1	1	1
P30	1	1	1	1	1	1	1	1
P31	1	1	1	1	1	1	1	1

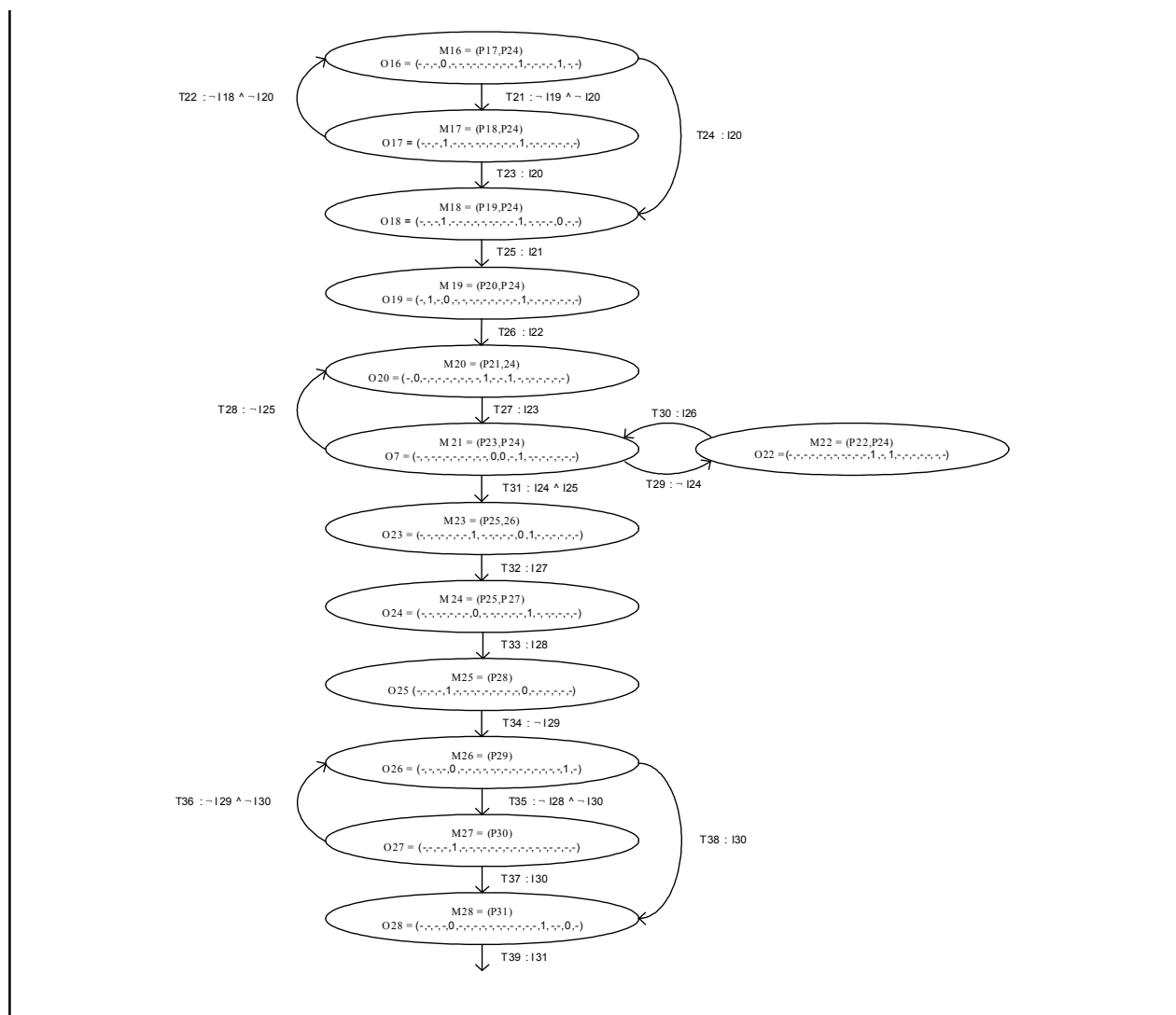
Tabel 3 T-invariant

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15
T1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T6	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T7	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
T8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T11	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T12	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T13	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
T14	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
T16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
T17	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T18	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T19	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T20	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
T22	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
T24	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
T25	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T26	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T27	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T28	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T29	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T30	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T32	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T33	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T34	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T35	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1
T36	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
T37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
T38	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0

Grafik ketercapaian yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Grafik Ketercapaian (berlanjut...)



Lanjutan Gambar 6 Grafik Ketercapaian

Berdasarkan grafik ketercapaian pada Gambar 6, diperoleh hasil verifikasi sebagai berikut:

- Kondisi pemecuan di setiap percabangan tidak ada yang berpotongan, maka sistem adalah bebas konflik
- Tidak ada busur yang berasal dan mengarah ke simpul yang sama, maka busur akan terminasi
- Sinyal keluaran memiliki nilai tertentu dan tidak kontradiksi, maka keluaran adalah benar secara Formal

Supaya memenuhi kriteria keselamatan, jumlah penanda yang ada pada suatu tempat tidak boleh lebih dari 1. Dari matriks *P-invariant* dapat dilihat bahwa dalam semua jalur perpindahan penanda yang mungkin terjadi, tidak ada tempat yang memiliki penanda lebih dari satu. Ini menyatakan bahwa JPST yang disusun memiliki kriteria keselamatan.

Jika suatu sistem memiliki daya hidup atau berkesinambungan, maka semua penandaan yang dapat dicapai dari penandaan awal sekurang-

kurangnya memiliki satu penandaan yang dapat dituju dan menjadi penandaan yang dituju dari penandaan lain. Dari matriks T-invarian dapat dilihat bahwa semua transisi memiliki tempat asal dan tempat tujuan. Urutan-urutan pemicuan juga menunjukkan suatu pemicuan tertutup yang membentuk siklus. Hal ini berarti bahwa JPST yang disusun bebas dari kebuntuan dan memiliki daya hidup. Beberapa vektor dalam matriks T – invarian menunjukkan suatu rangkaian pemicuan yang berasal dan berakhir di penandaan M0. Hal ini menunjukkan bahwa JPST yang disusun memiliki kriteria keterbahrungen.

Dari evaluasi menggunakan metrik transparansi diperoleh hasil sebagai berikut:

Metrik transparansi t1: komentar

$$t1 = \frac{70}{31+39} = 1 \rightarrow \text{semua tempat dan transisi memiliki komentar}$$

Metrik transparansi t2: keterarahan

$$t2 = \frac{63}{78} = 0,81 \rightarrow \text{ada 15 busur yang tidak mengarah ke bawah}$$

Metrik transparansi t3: perpotongan busur

$$t3 = 1 - \frac{0}{78} = 1$$

Metrik transparansi t4: sinyal masukan berlebih

$$t4 = 1 - \frac{0}{31} = 1 \rightarrow \text{tidak ada sinyal masukan berlebih}$$

Metrik transparansi t5: sinyal keluaran berlebih

$$t5 = 1 - \frac{0}{20} = 1 \rightarrow \text{tidak ada sinyal keluaran berlebih}$$

Metrik transparansi t6: pengaturan keluaran berlebih

$$t6 = \frac{99}{99} = 1 \rightarrow \text{tidak ada pengaturan keluaran berlebih}$$

Metrik transparansi t7: keselamatan

$$t7 = 1 - \frac{0}{28} = 1 \rightarrow \text{tidak ada tempat yang memiliki penanda lebih dari satu}$$

Metrik transparansi t8: penyesuaian dinamis

$$t8 = 1 - \frac{0}{28} = 1 \rightarrow \text{tidak ada suatu pemicuan yang serta-merta menyebabkan pemicuan lain}$$

Kerumitan ekspresi JPST:

$$EC_{JPST} = \frac{32}{39} = 0,82 \rightarrow \text{ekspresi mudah dipahami}$$

Metrik transparansi t9: kerumitan ekspresi

$$t9 = 1 - \frac{\max(\min(0.82, 5), 3) - 3}{2}$$

$$t9 = 1 - 0 = 1 \rightarrow \text{mudah dipahami}$$

Metrik transparansi gabungan:

$$T = \frac{1+0,81+1+1+1+1+1+1}{9} = 0,98$$

\rightarrow terdokumentasi dengan baik

SIMPULAN

Pada makalah ini telah dibahas perancangan sistem otomasi pada proses fermentasi curah bioetanol dari bahan baku singkong agar proses produksi dapat berjalan dari awal sampai akhir proses. Sistem otomasi yang dirancang didapatkan dengan menggunakan metoda analisis yang dikenal dengan nama JPST. Keunggulan metode analisis dibandingkan dengan metode coba-coba berbasis pengetahuan adalah terdapatnya jaminan kinerja pada sistem otomasi secara terstruktur dan terdokumentasi. Sehingga, sistem otomasi yang dirancang akan bekerja secara benar dan terus menerus sesuai dengan urutan proses yang berlaku, tanpa ada kebuntuan dan berhenti pada suatu keadaan proses tertentu.

Hasil analisis invarian membuktikan bahwa diagram JPST yang dibangun memenuhi kriteria keterbatasan, keselamatan, dan daya hidup. Hal ini diperlihatkan oleh nilai-nilai pada metrik transparansi.

Pada hasil analisis dari grafik ketercapaian membuktikan bahwa JPST yang disusun memenuhi kriteria bebas konflik, terminasi, dan keluaran benar secara formal. Diagram JPST yang dibuat sudah memenuhi kriteria yang ditentukan dan memiliki metrik transparansi 0,98 dari maksimal 1. Hal ini berarti bahwa diagram JPST yang disusun terdokumentasi dengan baik, sehingga dapat diterapkan menjadi program tangga (*ladder program*) yang dapat secara langsung diterapkan pada PLC.

RUJUKAN

- Curran, J. 1989. *Industrial Microbiology*. London, U.K.: Rand Mc Nally and Co.
- Frey, G. 2000a. Transparency Analysis of Petri Net based Logic Controllers-A Measure for Software Quality in Automation. *Proc. American Control Conference*. Chicago, June.
- Frey, G. 2000b. Automatic Implementation of Petri Net based Control Algorithms on PLC. *Proc. American Control Conference*. Chicago, June.
- Frey, G., and Schettler, H.G. 1998. Algebraic Analysis of Petri Net based Control Algorithms. *Proc. of the 4th IEEE WODES*. Cagliari.
- Joelianto, E., and Loeis, K. 2006. Application in Control of Boiler using Signal Interpreted Petri Nets (SIPN). *Proc. 6th Asian Control Conference*. Bali, Indonesia, July.
- Joelianto, E., dkk. 2006. A Discrete Event Controller for PV-Wind Hybrid Energy Systems using Signal Interpreted Petri Net. *Proc. 6th Asian Control Conference*. Bali, Indonesia, July.
- Mostavan, A., dkk. 2006. Discrete Event Controller Design of A Solar PV Water Pumping System using Signal Interpreted Petri Net. *Proc. 6th Asian Control Conference*. Bali, Indonesia. July.
- Parshall, J., and Lamb, L. 2001. *Applying S88: Batch Control from User's Perspective*. North Carolina: Instrument Society of America.
- Pederson, C.S. 1978. *Microbiology of Food Fermentations*. Connecticut: AVI Publishing co. Inc.
- Sheehan, J.C. 1995. *Modern Bioprocess*. New Haven: Yale University Press.
- Shuler, M. and Kargi, F. 1992. *Bioprocess Engineering: Basic Concepts*. New Jersey: Prentice Hall International.
- Wang, J. 1998. *Timed Petri Nets: Theory and Application*. Boston: Kluwer Academic Publishers.